

Modernización con bajo presupuesto de la estación hidrométrica de Guaqui, lago Titicaca

Bismarck Jigena Antelo¹
Luis Miguel Carrasco Nattes²
Juan Jose Muñoz Pérez³
Manuel Berrocoso Dominguez⁴
Renato Mamani Velázquez⁵

Recibido el 21 de julio de 2019; aceptado el 30 de agosto de 2019

Resumen

El Instituto Panamericano de Geografía e Historia (IPGH) ha financiado el proyecto GEOF 04 2018, para la modernización del seguimiento de los niveles del lago Titicaca en la estación hidrométrica del puerto de Guaqui, Bolivia. El proyecto ha consistido en la instalación de una nueva regla limnimétrica, así como la adquisición y colocación de un sensor de presión. El presupuesto final tuvo una disminución del 60% respecto al presupuesto original, por lo que el proyecto fue llevado a cabo gracias a la colaboración y patrocinio del Servicio Nacional de Hidrografía Naval de Bolivia (SNHN) y de la Universidad de Cádiz (UCA), España. Asimismo, la UCA dirigió la ejecución del proyecto, además de cursos de formación para preparar al personal del SNHN que posteriormente se encargará del mantenimiento de los equipos y de la descarga de los datos y del envío de datos a la UCA para su procesamiento y utilización con fines de investigación.

Palabras clave: *Benchmark, marca de nivel, nivel superficie lago, cero hidrográfico, mareógrafo, datum, hidrología.*

Abstract

The Pan-American Institute of Geography and History (PAIGH) has financed a project GEOF 04 2018, for the modernization of the monitoring of the Titicaca lake level in the Guaqui hydrometric station. The project consisted in the installation of a new limnimetric staff along with the acquisition and placement of a pressure sensor. The final budget has had a reduction of 60% with respect to the original

.....
¹ Departamento de Ciencias y Técnicas de la Navegación y Construcciones Navales, CASEM, Universidad de Cádiz, España. Correo electrónico: bismarck.jigena@uca.es

² Servicio Nacional de Hidrografía naval de Bolivia (SNHN), La Paz, Bolivia. Correo electrónico: carrascoluismiguel@gmail.com

³ Departamento de Física Aplicada, CASEM, Universidad de Cádiz, España. Correo electrónico: juanjose.munoz@uca.es

⁴ Laboratorio de Astronomía, Geodesia y Cartografía, CASEM, Facultad de Ciencias, Universidad de Cádiz, España. Correo electrónico: manuel.berrocoso@uca.es

⁵ SNHN, La Paz, Bolivia. Correo electrónico: renamave@gmail.com

thanks to the collaboration of the snhn (National Service of Naval Hydrography) of Bolivia. Likewise, the University of Cadiz has carried out an on-site course to prepare SNHN personnel who will later be responsible for the maintenance of the equipment and the downloading of the data and sending data to the UCA for processing and use for research.

Key words: Benchmark, pressure sensor, lake surface level, datum, hydrology, vertical reference level.

Introducción

Mediante el Reglamento de la Ley de Ministerios del Poder Ejecutivo, de acuerdo al Decreto Supremo No. 23660 del 12 de Octubre de 1993, se reconoció al Servicio Nacional de Hidrografía Naval (SNHN), la atribución y competencia de “Realizar la planificación, estudio, investigación, promoción, control y asesoramiento técnico-científico, de las actividades hidrográficas, de navegación y gestión de los recursos hídricos, que se desarrollan en el Estado Plurinacional de Bolivia” así como “Satisfacer las necesidades del usuario del medio ambiente acuático, con la producción de cartas náuticas, prestación de servicios de ayuda a la navegación e investigación técnico-científica, en el marco de la gestión integral del recurso agua” (SNHN, 2014, 2019). Una metodología para la gestión de este tipo información hidrológica en vías navegables ya fue presentada por Jigena et al. (2018).

De este modo, el SNHN venía realizando el almacenamiento y procesamiento de las lecturas limnimétricas enviadas por la Capitanía de Puerto Mayor “GUAQUI” del lago Titicaca, del año 1974 hasta la fecha. Sin embargo, durante los últimos cinco años, la regla instalada había sufrido el deterioro por su tiempo de uso y actualmente los datos se remitían al SNHN con mediciones efectuadas mediante flexómetros en forma empírica y referencial, este proceso casi artesanal introducía muchos errores en los datos recibidos en el SNHN, que afectaba en gran medida al procesamiento de los datos y en consecuencia a los resultados sobre la altura real del nivel del agua del lago para los fines requeridos por el SNHN y otras instituciones técnicas y científicas, (SNHN, 2014, 2019). Para intentar solucionar este problema, el doctor Bismarck Jigena, docente investigador de la Universidad de Cádiz (UCA) en España, remitió al SNHN, un proyecto para la instalación de sensores de presión (mareógrafos), para el control de los niveles del agua del lago Titicaca, con un presupuesto de USD14 600, además del apoyo de copatrocinio del SNHN (Bolivia) y de la UCA (España). La iniciativa fue presentada al Instituto Panamericano de Geografía e Historia (IPGH), para su financiamiento. Luego de varios intercambios de correos electrónicos, para los ajustes respectivos y tras una visita del mencionado investigador al SNHN en marzo de 2017, se elabora un nuevo proyecto consensuado y presentado al IPGH un mes después.

El 6 de marzo de 2018, el IPGH aprueba la concesión del proyecto GEOF 04 2018 "Modernización de la red de monitoreo hidrológico en el lago Titicaca (RMHLT), lago Menor o Huiñaymarca", difundido en el marco de la "Agenda Panamericana del IPGH 2010-2020", con un financiamiento aprobado de U\$D 5.866,00, correspondiente al 40% del financiamiento solicitado. La reducción de los fondos fue asumida gracias a la colaboración y cooperación altruista de la Universidad de Cádiz y de los técnicos y mandos del Servicio Nacional de Hidrografía Naval y de la Armada Boliviana. Por lo que, se tuvo que encarar una nueva planificación de las actividades del proyecto, así como la asignación de responsabilidades para la instalación y cuidado de los equipos. Las labores consideradas fueron:

1. Reconocimiento del área de interés para la elección del sitio más adecuado para la reinstalación de la estación hidrométrica y el sensor de presión.
2. Instalación de una nueva regla limnimétrica y sensor de presión.
3. Realización de un taller de capacitación para la instalación de la nueva estación hidrométrica dotada con sensor de presión y regla limnimétrica para la lectura de los niveles del mareógrafo. También se incluyó la enseñanza en el manejo del software para la adquisición y gestión de los datos de niveles de agua del lago Titicaca.
4. Trabajos de nivelación para monumentar un nuevo Benchmark (BM, del inglés bench mark, punto de referencia de altitud) que es el punto de referencia altimétrico del mareógrafo, instalado cercano a la nueva regla limnimétrica, y que además permitirá la determinación del "cero de la regla limnimétrica y del sensor de presión".
5. Instalación de un mareógrafo, para obtener lecturas digitales y georreferenciadas de niveles de agua del lago Titicaca.

El objetivo de este artículo es la presentación de las metodologías utilizadas, tanto en el aspecto humano como de equipamiento, sus características, y las posibilidades que su instalación permitirá en cuanto al tipo de datos que se recogerán y que mejorarán sensiblemente y la calidad de los mismos.

Área de trabajo

El lago Titicaca está ubicado en el altiplano andino a una altitud media de unos 3 812 msnm, es el lago navegable más alto del mundo con una superficie total de 8 560 km², compartido entre Bolivia y Perú, correspondiendo el 56% de su superficie a Perú y el 44% restante a Bolivia, su eje mayor está orientado en sentido NW-SE y pasando por el estrecho de Tiquina, tiene una longitud de 173 kilómetros. El lago está formado por dos masas de agua separadas que se comunican por el umbral geológico denominado Estrecho de Tiquina, este fenómeno físico es la principal característica de esta masa de agua (SNHN, 2007).

La zona más grande es la situada al norte, denominada Lago Mayor o Chucuito, la parte más pequeña ubicada al sur llamada Lago Menor o Laguna Huiñaymarca, es allí donde se ubica la Capitanía de Puerto Mayor "GUAQUI" y la Unidad Operativa de Servicios "NAVTUR", que son unidades operativas de la Armada Boliviana dependientes del Cuarto Distrito Naval "TITICACA". La estación hidrométrica Guaqui está instalada en la localidad de Guaqui y más específicamente en el puerto de Guaqui, en la Provincia Ingavi del Departamento de La Paz, a una distancia de 91 km de la ciudad de La Paz sobre la carretera internacional que va al municipio de Desaguadero y la población del mismo nombre, frontera con la República del Perú (Figura 1).



Figura 1. Ubicación general del lago Titicaca y de la población de Guaqui, donde se encuentra instalada la Estación Linimétrica "Guaqui".

Fuente: elaboración propia en base a imágenes de Google Earth.

Las profundidades máximas se pueden encontrar en el del Lago Mayor, en la parte boliviana, al noreste de la Isla Campanario, donde se alcanza una profundidad de 275 m, mientras que en el estrecho de Tiquina, la profundidad entre los muelles de las poblaciones de San Pedro y San Pablo es de 36 m. En el Lago Menor, la profundidad máxima es de 30 m frente al faro de la población de Chua. El lago, pese al enorme volumen de agua que embalsa, no presenta mareas significativas y la diferencia de lecturas simultáneas en diversas estaciones hidrométricas se debe más a efectos meteorológicos que a efectos astronómicos (SNHN, 2007). Las características principales se aprecian en la Tabla 1.

Tabla 1
Características del lago Titicaca

Característica	Lago Mayor	Lago Menor
Longitud máxima (km)	130	30
Ancho máximo(km)	68	58
Profundidad máxima (m)	275	39
Profundidad media (m)	135	23
Superficie (km ²)	6 642	1 388
Volumen (hm ³)	8 966 105	3 192 104
Altitud media (msnm)	3 192 104	3 192 104

Para la georreferenciación horizontal y vertical de la estación hodrométrica Guaqui, se cuenta con tres mojones o marcas de referencia o BM en el área de trabajo y son los siguientes:

- El BM N° 38, que es el punto principal de referencia altimétrica, está ligado con Red Geodésica Nacional de Altimetría y desde este punto se ha dado la altitud a los otros puntos de referencia, por sus características este punto es el BM de referencia altimétrica de la estación, designado como TGBM (Tide Gauge Benchmark). El "BM No. 38" se encuentra en el Departamento de La Paz, Provincia Ingavi, puerto Guaqui, en la localidad del mismo nombre, físicamente monumentado en el predio de la Unidad Operativa de Servicios (UOS) "NAVTUR", de la Armada Boliviana. Al BM se llega ingresando por el camino principal hasta las instalaciones de la Unidad Operativa de Servicios "NAVTUR", y pasando dichas instalaciones hasta el final de la vía férrea, lugar donde hay una pequeña edificación, el BM se encuentra a tres metros antes de llegar a dicho punto y más próximo al riel del lado derecho. El BM No. 38, está físicamente monumentado mediante un bulón de bronce de forma circular empotrado en bloque de cemento con la inscripción: HIDROGRAFÍA, No 38. BOLIVIA.
- El BM RN-01, es la referencia altimétrica más cercana a la Estación Hidrométrica Guaqui, al igual que el anterior se ingresa por el camino principal hasta llegar a la UOS "NAVTUR", se realiza un recorrido por el Patio de Honor, y pasando dichas instalaciones hasta el final de la última construcción de casas de calamina. El punto RN-01, se encuentra en las cercanías del cantil del muelle que se encuentra en el Canal Guaqui. El mojón RN-1 está físicamente monumentado por un bulón de bronce de forma circular empotrado en bloque de cemento con la inscripción: HIDROGRAFÍA NAVAL, RN-1, GUAQUI, MAY- 08, BOLIVIA.

- El Mojón "RN2" es la segunda referencia altimétrica más cercana a la estación, al igual que el anterior (RN-1), se ingresa por el camino principal hasta llegar a la UOS "NAV TUR", se realiza un recorrido por el Patio de Honor, y pasando dichas instalaciones hasta el final de la última construcción de casas de calamina. El punto RN-02, se encuentra en las cercanías del cantil del muelle que se encuentra en el canal Guaqui. Está físicamente monumentado por un bulón de aluminio de forma circular empotrado en bloque de concreto con la inscripción: SNHN.

Mayores detalles de la ubicación de los BM de referencia los podemos apreciar en la Figura 2, y las coordenadas de estas marcas de nivel se muestran en la Tabla 2.



Figura 2. Ubicación de la Estación Hidrométrica de Guaqui, dentro de las instalaciones de la UOS NAVTUR (Armada Boliviana), donde también apreciamos la ubicación de las marcas de referencia de nivel (BM) o puntos de referencia altimétrica del mareógrafo.

Fuente: elaboración propia en base a imágenes de Google Earth.

Se dispone de trabajos batimétricos previos del Canal de acceso "Guaqui" que han sido utilizados como referencia técnica para el establecimiento de la nueva estación.

El clima en la zona de trabajo es semiárido, la precipitación anual varía de 400 a 600 mm con lluvias durante el verano y sequedad en el invierno. Normalmente las precipitaciones vienen acompañadas por tormentas eléctricas y fuertes granizadas, generalmente durante los meses de diciembre a abril. La precipitación es mayor en los valles abruptos de la Cordillera Oriental. Además, se tienen cambios bruscos de temperatura, llegando durante el día a registrarse máximas de 18° C y mínimas por la noche hasta -5° C, siendo los meses de junio y julio los más fríos del año.

Tabla 2
Coordenadas del punto de referencia de mareógrafo
(BM 38) y de los puntos auxiliares

Est	Lat (S)	Lon (W)	Altitud (msnm)	Datum Horizontal	Datum Vertical
BM 38	16°35'10.9348"	68°51'19.1677"	3.810.988	PSAD-56	Arica (Chile)
RN 01	16°35'11.5023"	68°51'17.2324"	3.811.025	PSAD-56	Arica (Chile)
RN 02	16°35'11.5823"	68°51'17.0224"	3.811.222	PSAD-56	Arica (Chile)

Metodología

Personal

La organización y ejecución de los trabajos de reconocimiento e instalación de la Estación Hidrométrica "Guaqui" estuvieron a cargo de cuatro miembros del personal técnico del SNHN y un investigador de la UCA que se desplazó hasta el área de trabajo y dos investigadores UCA que prestaron apoyo y asistencia técnica *on line* durante la ejecución de los trabajos.

De manera más específica, el jefe de comisión, ingeniero hidrólogo designado por el SNHN y el profesor-investigador de la UCA, fueron los responsables de la planificación del trabajo y de la coordinación con el personal tanto de la Capitanía de Puerto Mayor "GUAQUI" como de la UOS "NAVTUR"; así como la elaboración del plan de trabajo, organización de viaje, supervisión del alistamiento general de los equipos, revisión de normas técnicas e hidrológicas para instalación de estaciones hidrométricas, trabajos de gabinete y la elaboración del informe técnico final.

El topógrafo se encargó de realizar los trabajos de nivelación geométrica de los bancos de nivel, de la regla limnimétrica, de cálculos complementarios y la elaboración de las fichas de descripción correspondiente.

El investigador de la UCA fue el responsable de la adquisición del equipo (mareógrafo) y del resto de materiales; combustible e insumos necesarios para llevar adelante los trabajos. Asimismo, de la capacitación del personal técnico del SNHN en el manejo del Software "AQUAlogger", para la adquisición y gestión de datos de niveles de agua, así como de la instalación y fondeo del mareógrafo.

Especificaciones técnicas de los equipos

Equipo para georreferenciación y topografía

Para la georreferenciación de los puntos de control se utilizaron técnicas GNSS- GPS (Berrocoso *et al.*, 2007, 2012; Jigena *et al.*, 2014), se establecieron tres puntos de

control en las cercanías de la estación. Además, para realizar la georreferenciación se usaron dos equipos GPS Leica 1200, y para el procesamiento de datos GPS se empleó el software Leica Geomatic Office. Las coordenadas absolutas obtenidas fueron referidas al sistema de referencia WGS-84 (World Geodetic System, 1984), sistema global estándar utilizado por todos los sistemas GNSS.

Para dar cota altimétrica a los puntos de control se utilizó un nivel óptico marca Wild, modelo N2, que es un instrumento topográfico óptico usado para hacer las mediciones de nivelación geométrica de alta precisión, con lecturas sobre reglas de nivelación o estadias. Este tipo de nivel es un instrumento óptico de imagen directa sobre la regla de nivelación y consta de un nivel vertical de coincidencia, anillo de enfoque de la cruz filar y del campo visual, además de trabajos topográficos, puede ser utilizado para el control geodésico cumpliendo con los estándares del segundo orden geodésico, con una precisión de 0.7 mm por cada kilómetro de doble nivelación (ida y vuelta), dependiendo del tipo de regla y de la técnica utilizada. Los cálculos de nivelación se realizaron tomando en cuenta la metodología propuesta por Berrocoso *et al.* (2007) y Jigena *et al.* (2014). Durante la obtención de datos, es necesaria la utilización de registro en formularios de nivelación geométrica. Para mayor detalle véase la Figura 3.



Figura 3. Vista de la regla de nivelación (izquierda) y del nivel Wild N2 (derecha).

Equipo hidrométrico

El sensor AQUAlogger 520 (Figura 4) es un instrumento de tamaño reducido que trabaja midiendo la presión hidrostática de la columna de agua que se encuentra por encima del sensor, transformando esta presión en altura de la columna de agua y determinando de esta forma el nivel instantáneo del agua. Es capaz de monitorear mediciones precisas de temperatura y presión a profundidades de hasta 1 000 m, pero en nuestro caso está calibrado para



Figura 4. Sensor de presión AQUAlogger 520.

mediciones de hasta 30 metros de profundidad y que repercute en una mayor precisión en las lecturas y que corresponde a $\pm 0,05^\circ$ C en temperatura y de 0.005% a escala completa para cada 10 m, en presión. Con estos datos y precisiones se obtuvieron las mediciones instantáneas del nivel del lago (Jigena-Antelo *et al.*, 2015). El dispositivo es una alternativa flexible dado su diseño autónomo y es apropiado para aplicaciones tanto oceánicas, como fluviales, lacustres y medioambientales. Tiene un diámetro estrecho (sólo 32 mm), lo que lo hace adecuado para tomar medidas precisas en espacios pequeños. Su lector, con conexión por USB, permite cargar fácilmente hasta 250 000 lecturas de parámetros registrados usando un sistema de comunicación inalámbrico. Dado que el AQUAlogger 520 no requiere ningún conector, asegura que sus datos están protegidos contra fugas. La duración de su batería es hasta por cinco años para una configuración de implementación típica. Para la lectura de datos hidrométricos se han tenido en cuenta las metodologías propuestas por OMM (1994), Chamorro (2008), Vidal *et al.* (2012) y Jigena *et al.* (2014, 2015, 2018).

Otros equipos

Para el proceso de datos de campo se utilizó el equipo de computación portátil Lenovo Intel(R) Core (TM) i7-4702MQ de 2,20 GHz, con sistema operativo Windows 10 de 64 bits y un equipo de escritorio Intel(R) Core (TM) i5 de 2Ghz. Asimismo, también fue necesaria una impresora multifuncional Epson L210.

En cuanto a las comunicaciones se hizo uso de la red de telefonía celular existente en la zona de trabajo, tanto entre los propios miembros de la Comisión como con la Oficina Central del SNHN.

Trabajos de reconocimiento

Los trabajos de reconocimiento comprendieron la visita *in situ* a la estación hidrométrica “Guaqui”, para la verificación y elección del sitio más apropiado desde el punto de vista técnico y de infraestructura. En este aspecto, los trabajos realizados se describen a continuación.

En la Capitanía de Puerto Mayor “Guaqui”, se verificó la ubicación de la regla desde la cual se remiten actualmente las lecturas diarias al SNHN (Figura 5). La posición actual en el muelle de la Capitanía, muestra bastante vegetación, que dificultaría la reinstalación y principalmente el colocado del mareógrafo, razón por la cual no se consideró esta ubicación.

Como se determinó que no sería posible reinstalar la nueva regla en predios de la Capitanía de Puerto, se procedió a buscar otras localizaciones, optando como mejor opción su ubicación en los predios de la Unidad Operativa de Servicios “NAVTUR” (frente a la Capitanía de Puerto), observando en primera instancia la regla actual desde la que personal de “NAVTUR” hace sus lecturas (ver la composición de la Figura 6).

Se puede comprobar que el muelle de “NAVTUR” sí cuenta con la infraestructura adecuada para reinstalar una regla. Sin embargo, al ser un sitio de permanente atraque de embarcaciones, se corre el riesgo de que el sensor sea averiado o destruido por golpes de las embarcaciones en la maniobra de atraque, además durante el atraque de las embarcaciones se genera oleaje que provocaría lecturas falsas en el sensor al ser un equipo de registro continuo, razones por las cuales también se desestimó este sitio.



Figura 5. Ubicación de la regla actual del SNHN en los predios de la Capitanía de Puerto mayor “Guaqui”.

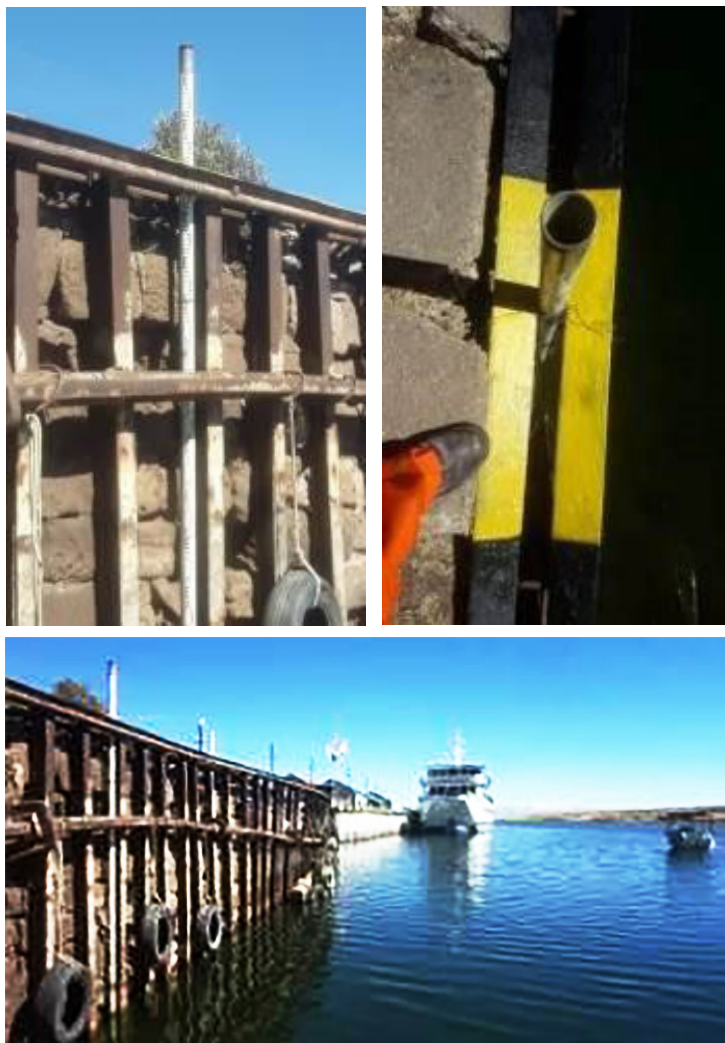


Figura 6. Ubicación de la regla actual en la UOS NAVTUR.

Finalmente, se realizó la inspección en la zona de atraque del barco multipropósito "Mosoj Huayna", al final del muelle hacia el oeste. Se consideró dicho sitio como el más idóneo y de mejores condiciones para la instalación del sensor y reinstalación de la regla limnimétrica al estar protegido y contar con la infraestructura necesaria para la fijación de la regla limnimétrica y del sensor (Figura 7).

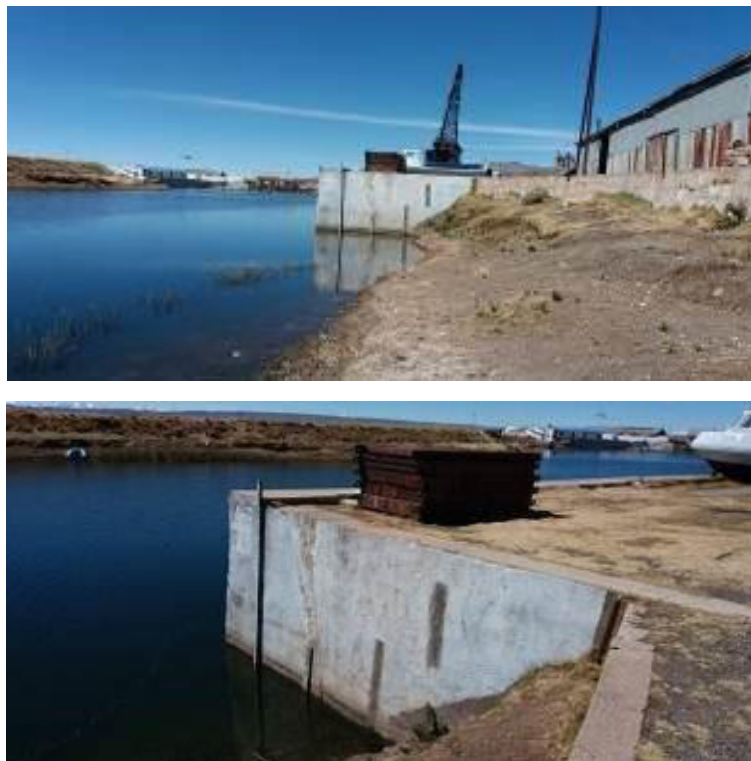


Figura 7. Ubicación de la regla limnimétrica y el mareógrafo, en el muelle de atraque del Barco Multipropósito “Mosoj Huayna”, al final del muelle hacia el oeste.

También se procedió al reconocimiento del lugar, al objeto de verificar la existencia y el estado del BM N° 38, punto fundamental de altimetría, establecido por el SNHN y vinculado a la Red de nivelación geométrica de primer orden del Instituto Geográfico Militar (IGM), está referido al datum vertical de la red altimétrica de Bolivia establecida por el IGM que es el mareógrafo de Arica-Chile. Este es punto fundamental que será utilizado como Punto de Control de Referencia Altimétrica del Sensor (TGBM, Tide Gauge Benchmark).

Obtención de la información topográfica

Nivelación geométrica de bancos de nivel

En días posteriores al reconocimiento se realizaron los trabajos de instalación de la regla limnimétrica y el sensor y su georreferenciación respecto a los puntos de control altimétrico para el cero de la regla y el sensor. Se verificó el estado

del BM38 y se establecieron dos nuevas marcas de control (BM), el BM RN-01 y el RN-02, materializados con bulón de bronce y aluminio respectivamente. Se procedió a realizar la nivelación geométrica desde el BM N° 38 (TGBM) hasta las Marcas Auxiliares para Control de Mareógrafos (TGAR, Tide Gauge Auxiliary Reference), que en este caso serían las marcas altimétricas RN-01 y RN-02. La nivelación geométrica se realizó aplicando el método compuesto de ida y vuelta, con distancias no mayores a 50 m desde el instrumento hasta la regla de nivelación y lecturas del hilo superior, medio e inferior, cumpliendo con los estándares del segundo orden geodésico, con una precisión de 0.7 mm por cada kilómetro de doble nivelación (ida y vuelta). Para la instalación y georreferenciación de la estación se han tomado en cuenta los criterios de OMM (1994), Berrocoso *et al.* (2007), Chamorro (2008), Vidal *et al.* (2012) y Jigena *et al.* (2014, 2015, 2018).

Nivelación geométrica de la estación limnimétrica

Para el establecimiento del cero de la regla de la estación limnimétrica instalada en el Puerto de "GUAQUI", se aplicó igualmente la nivelación geométrica compuesta de ida y vuelta. Dicha nivelación se realizó desde el BM RN-1 "GUAQUI" debidamente materializado con bulón de bronce, quedando el cero de la regla y el cero del sensor en las siguientes cotas:

Cero de la Regla Limnimétrica:	Cota Ortométrica: 3807.191 msnm
Cero del Sensor de Presión PT520:	Cota Ortométrica: 3807.561 msnm

Otros

Se elaboraron las Fichas de descripción de las marcas de nivelación (BM), que son el BM38, RN-01 "GUAQUI" y RN-02 "NAVTUR", que serán considerados como puntos fundamentales de referencia para futuras actividades de reinstalación y restitución de la estación limnimétrica, así como de apoyo a otras actividades técnicas donde se requiera contar con un datum de referencia altimétrico.

Obtención de información hidrométrica

Preparación de la Regla Limnimétrica

En instalaciones del SNHN previo al viaje de instalación, se procedió a la preparación de la regla limnimétrica y del sistema de sujeción del sensor (mareógrafo). El sistema está conformado por cuatro tramos de fibra de vidrio de un metro de longitud cada uno, que mediante remaches fueron fijados a una regla de acero inoxidable de cinco metros de longitud. Asimismo, en forma paralela y mediante sistema de soldadura, se adosó un tubo de acero inoxidable de 1.5", dentro del cual se colocaría el mareógrafo. Finalmente se soldaron pletinas de 30 centímetros de longitud a distancias de un metro entre cada una con orificios para la respectiva sujeción del sistema en la zona elegida de instalación (Figura 8).



Figura 8. Trabajos previos de preparación del sistema de regla y sensor de presión para la instalación de la estación limnimétrica de Guaqui.



Figura 9. Trabajos de colocación de la regla limnimétrica y del tubo donde se ubicaría el sensor de presión AQUAlogger.

Instalación de Regla Limnimétrica

En el sitio elegido para la ubicación de la estación limnimétrica de Guaqui, se procedió a preparar todo el equipamiento necesario para la instalación del sistema de regla limnimétrica y sensor de presión.

Con el apoyo de personal de la UOS "NAVTUR", se procedió, a colocar en agua una escalera metálica de cinco metros, desde la cual se procedió a hincar y nivelar la regla limnimétrica. Después, se perforaron los orificios en el muro de hormigón para la sujeción correspondiente. Cabe mencionar que el tubo que contendría el mareógrafo, se colocó después de la capacitación técnica impartida en campo (ver Figura 9). La instalación de la estación

se ha realizado de acuerdo a los criterios técnicos que se dan en OMM (1994), Chamorro (2008), Vidal *et al.* (2012) y Jigena *et al.* (2014, 2015, 2018).

Capacitación del personal

El Prof. Dr. Bismarck Jigena, investigador y docente de la UCA, procedió a dictar un curso-taller de capacitación en campo y en las oficinas del SNHN para el personal técnico del SNHN, consistente en el manejo del software AQUAtalk y gestión y procesamiento de los datos limnimétricos de los niveles del lago. Para la descarga y lectura de los datos del sensor, se procede colocando el sensor en el dispositivo lector, que por inducción accede a los datos registrados en el mareógrafo y se los descarga en formato propio de AQUAlogger y exportable a formato Excel (.xls) y texto plano (.txt) para su lectura, procesado e interpretación. Asimismo, el curso consideró las técnicas para el fondeo del sensor y colocado en el sitio para la medición de los niveles junto a la regla limnimétrica. Una vez terminado el curso, se procedió a calibrar el sensor (mareógrafo) para ser colocado en el tubo receptor mediante bridas plásticas a objeto de que comenzara su registro a las 13:00 horas del día 8 de agosto del 2018, con la previsión de retornar después de tres meses y retirar el sensor para el vaciado de datos.

Procesamiento de información

Nivelación geométrica

Los datos obtenidos de la nivelación geométrica compuesta fueron procesados aplicando formularios de proceso automático, desarrollados en la aplicación Microsoft Excel. Se tomó como referencia de partida, el dato vertical del BM N° 38, a partir del cual, mediante cálculo de los datos obtenidos en campo, se dio el valor de Cota Geométrica a los BMs RN-1 y RN-2. Asimismo, se utilizó la Cota Geométrica del BM RN-1, para determinar mediante cálculo la Cota Geométrica del cero de la estación limnimétrica "Puerto Guaquí". También se efectuaron tomas fotográficas para la elaboración de las respectivas Fichas de descripción y elaboración de la memoria pertinente. En gabinete, se empleó la aplicación del Microsoft Excel para el procesamiento de la nivelación geométrica compuesta.

Medición hidrométrica

La información que es reportada por la Capitanía de Puerto Mayor "GUAQUI", está siendo almacenada a partir de las lecturas de la nueva regla instalada en el muelle de la UOS "NAVTUR" y del registro que se genera el sensor de presión. Las lecturas de niveles con el sensor de presión iniciaron su registro a las 13:00 horas del 8 de agosto del 2018, con la previsión de retornar después de tres meses y retirar el sensor para el vaciado de datos. La lectura de datos hidrométricos se realizará de acuerdo a criterios OMM (1994), Chamorro (2008), Muñoz & Abarca (2009), Vidal *et al.* (2012) y Jigena *et al.* (2014, 2015, 2018).

Discusión y resultados

El logro de este trabajo con respecto a los resultados anteriores, se resume a continuación.

El presente trabajo representa una contribución a la extensión de estudios de niveles en lagos y sistemas de agua dulce en el mundo. En nuestro caso, se reinstaló la Estación Limnimétrica de Guaqui, utilizando equipos de última generación para la lectura de los niveles del lago, en este caso el sensor AQUAlogger PT520, que nos proporciona de forma directa medidas de presión y temperatura, con lo que aseguramos una medición en formato digital, continua y precisa de los niveles del lago y de la temperatura del agua en el lugar donde se encuentra instalada la estación.

El producto principal de este trabajo será una serie temporal con datos diarios y con frecuencia constante del nivel del lago, con una frecuencia de 1 datos/hora, y cuyo inicio está datado el 8 de agosto de 2018 a partir de las 13:00 horas y en el futuro nos permitirá corregir y reconstruir la serie original de la estación Guaqui, que cuenta con datos diarios a partir del 1 de enero de 1973, pero al ser datos observados y medidos en una regla hidrométrica, que ha sufrido muchos cambios a lo largo del tiempo, es una serie temporal que tiene muchos errores que no han sido filtrados.

La Tabla 3 muestra las coordenadas de los puntos de control y de los datos altimétricos de la Estación Guaqui. La altimetría se encuentra referida al datum vertical oficial de la Red Altimétrica del IGM de Bolivia, que corresponde al nivel medio del mar del mareógrafo de Arica, Chile.

Tabla 3
Establecimiento de Benchmarks, referidos
al datum vertical de Arica, Chile

Marca	Cota Altimétrica (msnm)	Observaciones
BM38	3 810.988	TGBM
RN01	3 811.025	TGAR
RN02	3 811.222	TGAR
Cero Regla	3 807.191	Cero de la regla limnimétrica
Cero Sensor	3 807.561	Cero del sensor de presión

El registro hidrométrico en la nueva estación Guaqui se inició con la lectura del 8 de agosto de 2018 a las 13:00 horas (H-4, Hora oficial de Bolivia), que se corresponde con una lectura en la regla limnimétrica de 1.08 m equivalente a 3 808.271 msnm. Hay que tomar en cuenta que en estas lecturas no se aplica ninguna corrección por efectos meteorológicos o efecto de barómetro invertido (Muñoz & Abarca, 2009), sin embargo, con los datos registrados por el sensor podremos obtener una serie temporal muy precisa, con frecuencia de observación constante, libre de errores humanos y que nos permitirá corregir la serie temporal que se ha registrado por medios mecánicos y analógicos desde 1973.

La recuperación de las observaciones históricas de los niveles del lago Titicaca y su disponibilidad para la comunidad científica es importante, para los temas de la investigación climática actual. Sólo unas pocas estaciones en todo el mundo tienen series temporales lo suficientemente largas para proporcionar información y que coadyuven al estudio de los cambios de niveles en lagos que se puedan utilizar para predicciones y estudios a nivel local o regional en su relación con el cambio climático.

Hay que tomar en cuenta que para el mantenimiento de la serie temporal del lago entre 1973 y 2018, el SNHN ha dedicado muchos esfuerzos a todo el proceso de su mantenimiento, sin embargo y pesar de todo se tienen saltos en la serie y errores de lectura por parte de los observadores, pero todas estas mediciones manuscritas del nivel del lago se encuentran almacenadas en los libros de registro originales y han sido digitalizadas y pasadas a formato electrónico para su registro, análisis y estudio.

A pesar de todos los errores y contratiempos en el mantenimiento de los archivos históricos de esta serie temporal, sin embargo, es importante destacar que ellos permitieron el establecimiento de un datum vertical local único y estable que hasta la fecha ha sido utilizado como referencia en trabajos hidrográficos, limnológicos y medioambientales.

Aunque la recuperación de las observaciones históricas es a veces difícil y tediosa, la información que proporcionan es única y original, y por lo tanto es muy valiosa y relevante para la investigación actual y futura. Esto debido a la escasez de observaciones de niveles de lagos en el mundo y que se remontan a más de un siglo y debido a la complejidad de lo espacial y a la variabilidad temporal y estacional de los niveles en los lagos, estas mediciones históricas, independientemente de las fuentes y los errores que lleven consigo, son un complemento valioso para la comprensión actual de los cambios de los niveles, los patrones que siguen y su relación con el cambio climático. De todo, esto lo más importante es el hecho de que si no se hacen esfuerzos con el objetivo de la recuperación, mejoramiento y el estudio del control de calidad de estos datos, que son únicos, se corre el riesgo de que los mismos puedan perderse definitivamente, siendo este un tema de gran preocupación en la comunidad científica.

El estudio de los niveles del lago, también es una fuente de datos muy interesante para otros estudios complementarios como la validación de series reconstruidas y que tengan datos heterogéneos que ayudarán a interpretar y conocer los patrones en la variabilidad de los niveles del lago o cambios en las componentes de los niveles del lago debido a factores meteorológicos y astronómicos. Por lo tanto, estamos seguros que cualquier esfuerzo dedicado a la recuperación, mantenimiento y control de calidad de los niveles del lago Titicaca, es un esfuerzo muy valioso y que será un gran soporte a la investigación de los niveles del lago, tanto a de manera local, como regional y global.

Conclusiones

Los trabajos de campo y de gabinete se efectuaron cumpliendo con el Plan de Trabajo presentado en el proyecto.

Después de cerca de 13 años se reinstaló la regla limnimétrica en la estación "GUAQUI", utilizando equipos de última generación para la lectura de los niveles del lago, en este caso el sensor AQUAlogger PT520 y se están monitoreando los niveles desde el 8 de agosto del 2018, asegurando de esta forma la adquisición y almacenamiento de datos digitales de los niveles del lago de forma continua y precisa.

A pesar de que la nueva estación GUAQUI dispone de un sistema de registro automático de datos, es necesario seguir contando con el apoyo del personal de la Armada Boliviana, tanto del Cuarto Distrito Naval "Titicaca" así como de la UOS "NAVTUR", para todo lo que es la seguridad de los equipos, al encontrarse en sus predios, además del apoyo que se requerirá para el mantenimiento y la lectura y descarga de datos.

Para la referenciación altimétrica, los datos del BM N° 38, fueron proporcionados por el Departamento de Hidrografía del SNHN. Se establecieron dos nuevas marcas de nivel para el control altimétrico de los datos de niveles del lago, los Benchmarks RN-01 "GUAQUI" y RN-02 "NAVTUR", que se han monumentado y georreferenciado al datum vertical del mareógrafo Arica-Chile, que además del control altimétrico de los niveles, permitirá en caso necesario la reinstalación y/o recuperación de la regla limnimétrica de la estación en caso de avería o destrucción, con la misma referencia altimétrica.

Mediante los cursos de capacitación, impartido tanto en las oficinas centrales del SNHN como en el área de trabajo, el personal técnico del SNHN, se encuentra capacitado tanto para el manejo del software AQUAtalk que permitirá la descarga y procesamiento de datos del mareógrafo, así como las técnicas para el reemplazo del sensor en forma periódica.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido posible a la financiación del proyecto GEOF 04 2018, "Modernización de la red de monitoreo hidrológico en el lago Titicaca (RMHLT),

Lago Menor o Huiñaymarca”, financiado por el Instituto Panamericano de Geografía e Historia (IPGH), a través de la Sección Nacional del IPGH en Bolivia y copatrocinado por la Universidad de Cádiz (UCA) y el Servicio nacional de Hidrografía Naval de Bolivia (SNHN).

Los autores agradecen al doctor Juan Carlos García Galindo, Director General de Relaciones Internacionales de la Universidad de Cádiz y al doctor Casimiro Mantell, Vicerrector de Investigación de la Universidad de Cádiz por sus gestiones y apoyo al proyecto a través de la financiación de la movilidad del investigador UCA hasta el área de trabajo. Asimismo, nuestro agradecimiento al Capitán de Navío Juan Pablo Montero Villegas, Director General del Servicio Nacional de Hidrografía Naval, por su apoyo en los trabajos de campo para instalación de equipos, movilidad del equipo de investigadores en el área de trabajo y toma de datos durante la ejecución del proyecto.

También agradecer al Comandante de la UOS NAVTUR y al personal de su unidad por su apoyo con personal y medios durante la instalación de la estación limnimétrica de Guaqui.

Bibliografía

- Berrococo, M., Enríquez de Salamanca, J.M.; Ramírez, M.E.; Fernández-Ros, A. & Jigena, B., 2007. "Determination of a local geoid for Deception Island", in Cooper, A., Raymond, C. & The 10th ISAES Team (eds.), *Antarctica: a keystone in a changing world*, Washington, D.C., The National Academies Press, Extended Abstract, 123, 4 pp.
- Chamorro de Rodríguez, G.I., 2008. "Guía de hidrometría de aguas superficiales. Medición del nivel de agua", separata SENAMHI/DGH No. 001-2008, Lima, Perú, 25 pp.
- Jigena, B.; Manani, R.; Muñoz-Perez, J.J.; Walliser, J.; Calderay, F. & Berrococo M., 2018. "Methodology for hydrological information management in waterways: Application to Bolivia", *Tecnología y Ciencias del Agua*, 9(4), 236-255.
- Jigena, B.; Vidal J. and Berrococo, M., 2014. "Determination of the mean sea level at Deception and Livingston islands, Antarctica", *Antarctic Science*, 27(1): 101-102. DOI: <https://www.doi.org/10.1017/S0954102014000595>.
- Jigena, B.; Vidal, J. and Berrococo, M., 2015. "Determination of the tide constituents at Livingston and Deception Islands (South Shetland Islands, Antarctica), using annual time series", *Dyna*, 82(191): 209-218, June, Medellín. DOI: <http://dx.doi.org/10.15446/dyna.v82n191.45207>
- Muñoz Pérez, J.J. & Abarca Molina, J.M., 2009. "Influencia del viento y de las variaciones de la presión atmosférica en el nivel del mar de marismas y estuarios", *Revista de Obras Públicas*, núm. 3.505.
- Organización Meteorológica Mundial (OMM), 1994. *Guía de prácticas hidrológicas. adquisición y proceso de datos, análisis, predicción y otras aplicaciones*, Publicación OMM No. 168, quinta edición, 781 pp.

- Servicio Nacional de Hidrografía Naval de Bolivia, (SNHN), 2007. *Hidrografía de Bolivia*, ed. Servicio Nacional de Hidrografía Naval, segunda edición, La Paz, Bolivia, 403 pp.
- , 2014. *Memoria Hidrométrica 2001-2014*, La Paz, Bolivia.
- , 2017. Portal del Servicio Nacional de Hidrografía Naval, <http://hidronav.org/vision/>
- Vidal, J.M., Berrocoso, M. & Fernández-Ros, A., 2012. "Study of tides and sea levels at Deception and Livingston islands, Antarctica", *Antarctic Science*, 24: 193-201.